Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris Malaquais

Master 2

Matériaux pour l'éco-conception

Enjeux et réusage des matières disponibles : Le papier comme matière première pour la construction.

Mémoire de R9

Soutenu par Mr Ballon Camille
Sous la direction de : Robert Le Roy, Leda Dimitriadi, Benoit Veran

Janvier 2014

Table des matières

PREMIÈRE PARTIE
I. UN MONDE CLOS

1. Contexte.

Nous devons aujourd'hui prendre conscience du monde qui nous entoure et de son aspect de bulle flottant dans l'espace. La planète est fragile et ses ressources ne sont pas illimitées. Il est important pour nous concepteurs, de prendre conscience du monde tel qu'il est. C'est la question de ce que nous voulons, de ce dont on est capable et de comment se préparer au futur.
Chacun de nous doit prendre conscience de l'existence de la dimension temps de notre espace. Nous interagissons grâce aux quatre dimensions, pourtant nous ne pensons qu'en actes à un instant T et non aux conséquences de ceux-ci sur l'avenir du monde.
Christian Schwagerl écrit dans son ouvrage "*L'âge de l'homme" :*

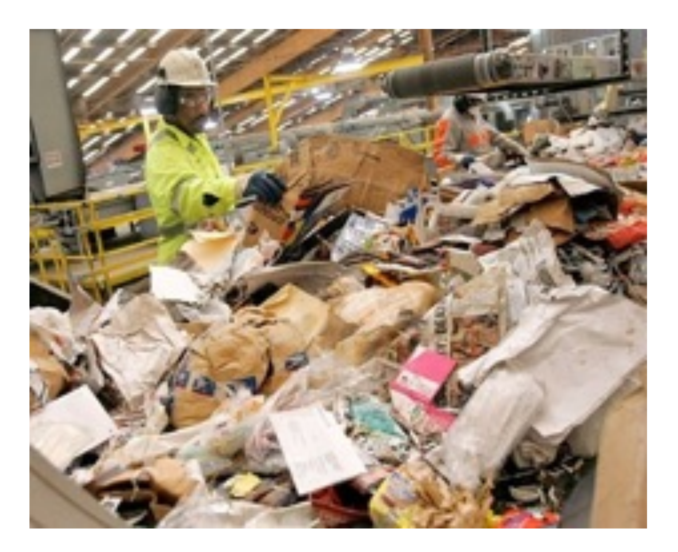
« Charles Darwin nous a appris que nous, les hommes, nous ne nous trouvons pas au bout de l'évolution, mais que nous sommes qu'une partie d'un grand amas d'arbustes d'êtres vivants. »

Si comme le décrit C.Schwagerl, nous vivons bien actuellement le passage de l'Holocène à l'Anthropocène, période géologique caractérisée par l'impact grandissant de l'Homme sur la terre et par un futur marqué substantiellement par les actes du genre Humain.
Alors chacun se doit d'agir.

C'est dans ce contexte que s'installe ce mémoire, cette recherche débute par le postulat que dans un monde fini, les ressources sont limitées et que nous devons faire un usage intelligent de chacune d'elles.
Récupérer, collecter, transformer, viabiliser, valoriser sont autant de mots pour guider chacune des étapes de ce séminaire

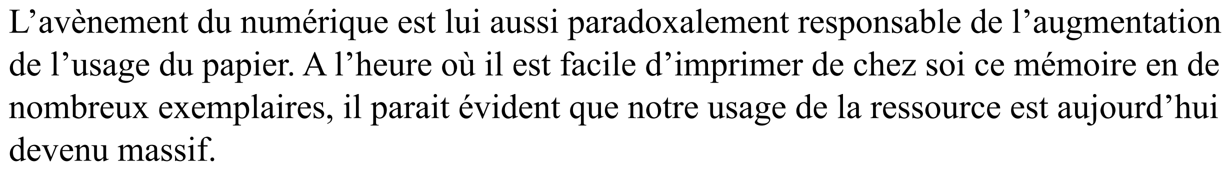
Ainsi, avec ce point de vue en tête, à force d'arpenter les rues Parisienne à des heures matinales, je m'aperçois assez vite que les trottoirs sont encombrés de matériaux papier que l'on a appris à contourner sans même les voir.
Ces matériaux sont présents sous des formes bien différentes : journaux, cartons, magazines, mouchoirs, feuilles de papier entières/découpées, PLV, emballages, affiches, etc. Les poubelles parisiennes en sont remplies. Une poubelle jaune à même été allouée en partie à la récupération des déchets papier (en plus d'autres matières recyclables), l'initiation du tri sélectif me donne à penser que la filière de recyclage des matériaux papiers doit être performante et efficace en France, cependant j'ai voulu me pencher sur la question.

2. Comprendre et valoriser un déchet.



Avec 339 millions de tonnes de papier consommées chaque année dans le monde. Le papier représente sur la planète un peu plus d’un quart de notre production de déchets.

Prenez dix minutes et faites le test : comptez autour de vous les objet en papier : livres, feuilles, sacs, murs, post-it. Le papier est omnipresent dans nos vies actuelles.
Depuis la naissance du fax en 1861 jusqu’à la première imprimante

personnelle d’IBM en 1976, nos usages du papier se sont démultipliés.

L’avènement du numérique est lui aussi paradoxalement responsable de l’augmentation de l’usage du papier. A l’heure où il est facile d’imprimer de chez soi ce mémoire en de nombreux exemplaires, il parait évident que notre usage de la ressource est aujourd’hui devenu massif.
Si l’on parle depuis environ 60 ans d’un hypothétique « zéro papier » il faut rester pragmatique et comprendre que l’on ne peut pas à court terme, se passer de papier. Il va continuer à coexister avec le numérique dans nos pays développés et il reste aujourd’hui le premier support de communication dans le monde.

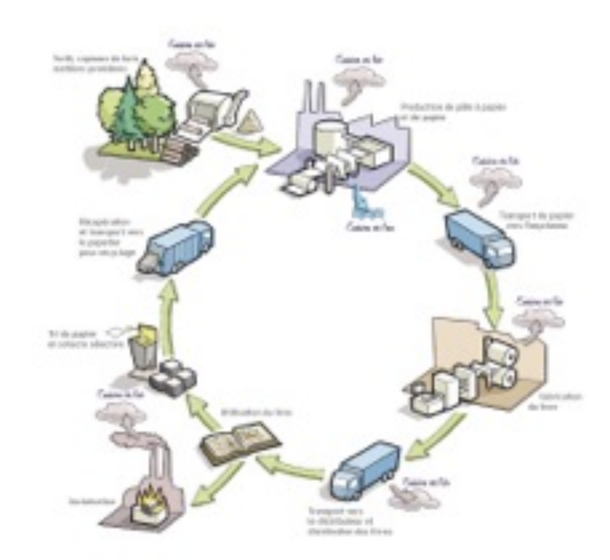
Le constat étant posé, nous pouvons nous demander maintenant que deviennent les 11 millions de tonnes de déchets papier produites en France chaque année (soit 167,2kg de papier par an et par personne).
Sur ces 11 millions de tonnes, la filière de collecte et de recyclage française recycle et valorise les 2/3 de la ressource, soit 7,3 millions de tonnes. Sur ces 7,3 millions de tonnes, une partie est recyclée et une autre brulée en vue de produire de l’énergie.
Il reste donc une ressource exploitable non valorisée d’environ 3,7 millions de tonnes de papier et cela, simplement à l’échelle de la France.

Trouver une ressource exploitable ne se suffit pas à elle seule pour justifier la démarche de recherche de cet enseignement. En effet, pour que cette recherche trouve un sens, il faut qu’il y ait un besoin. La question est donc maintenant, comment valoriser la resource dans le secteur du bâtiment.
Pour répondre à cette question, nous devons commencer par comprendre ce qu’est cette ressource, quels sont ses points forts et points faibles et comment pourrions-nous en tirer profit dans le but d’améliorer l’existant.

Qu’est ce que le papier ? A l'échelle microscopique, le papier, c’est avant tout des fibres de celluloses ($C_6H_{10}O_5$), ces fibres sont composées de glucoses liés entre eux pour

former des polymères eux même liées entres eux par des liaisons hydrogène. La longueur de ces polymères définie les différentes classifications : microfibrilles , macrofibrilles, fibres.
Ces fibres de cellulose sont le principal constituant du bois et plus globalement des végétaux, c'est la matière première organique la plus abondante sur terre totalisant plus de 50% de la biomasse.

A l'échelle macroscopique, le papier c'est avant tout des arbres. Si la question de l'impact environnemental de la coupe des arbres peut se poser, cette question est aujourd'hui en nette amélioration, grace à la mise en place de forets industrielles équitablement gérées, ainsi que de l'éco-certification permettant d'assurer la légalité et la qualité du bois ainsi que la qualité de la gestion forestière dite durable.



Ainsi grâce aux quatre organismes de certification : FSE (Forest Stewardship Council), PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification schemes), SFI (Sustainable Forestry Initiative) et CSA (Canadian Standard Association), il est maintenant aisé de reconnaitre une production éco-responsable.
Ces organismes qui découlent du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro (Brésil, Juin 1992) certifient les produits issus des exploitations de bois. Cependant pour que les produits soient certifiés, la chaine entière doit être certifiée, de la coupe d'exploitation aux industriels assurant les transformations.

La délocalisation de la production de bois force pourtant les filières à transporter sur de longues distances les produits bruts et manufacturés issus de cette industrie. Ce transport à un impact évident sur l'environnement. Cependant sur le plan écologique, le bois jouit d'une bonne image en raison de la faible consommation d'énergie fossile dans sa production.

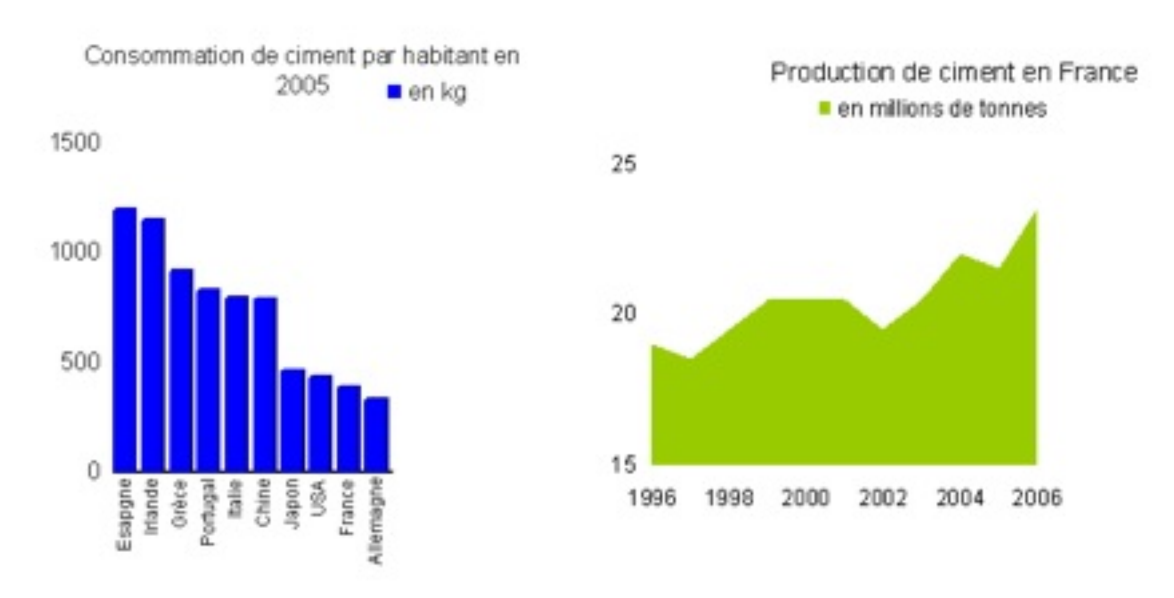
Réaliser l'ACV (Analyse du Cycle de Vie) d'un arbre à peu d'intérêt, en raison de sa nature. L'arbre est un capteur naturel de CO_2, il stocke le dioxyde de carbone tout au long de sa vie. Ce CO_2 le fait grandir et est rejeté à la mort de l'arbre. Le ministère de l'écologie publie en 2011 un rappel stipulant :
« *Les arbres absorbent du carbone, principalement pendant leur phase de croissance, entre quelques dizaines et plus d'une centaine d'années. Ils le stockent ensuite toute leur vie. Un palissandre de 80 ans fait environ 30 mètres de haut et stocke 5,4 tonnes de CO_2, soit les émissions d'un vol de 600 km en Airbus A320, avant de le rejeter après sa mort lorsqu'il se décompose ou qu'il est brûlé.* »

Dans le cas d'une fôret non exploitée, la mort de l'arbre et sa décomposition entrainent un rejet massif de CO2 dans l'atmosphère qui est compensé par la pousse d'un nouvel arbre, la forêt est à l'équilibre et l'on parle alors de: "puits de carbone".
Si l'exploitation forestière n'est pas gérée dans le cadre d'une exploitation dite "sauvage", le prélèvement d'un arbre n'est pas compensé par la pousse d'un nouvel arbre.
Dans le cadre d'une exploitation forestière gérée et certifiée par un éco-label, si l'arbre n'est pas coupé pour être brûlé, alors le CO_2 stocké pendant sa pousse est emprisonné dans les matériaux issus de sa coupe (planche/chevrons/fibres de cellulose, etc.).
Ces matériaux nous intéressent ici au plus haut point grâce à leur bilant carbone négatif, ils représentent un moyen évident de baisser la dette carbone d'un matériau hôte.

3. L'hôte.

C'est à partir de ces constats et observations que la réflexion conduisant à cette recherche s'est mise en place. Si le choix de la matière première du thème de la recherche était définie, il restait à concevoir un moyen d'introduire des déchets papiers dans le processus de fabrication d'un matériau utilisable dans le secteur de la construction.
Dans un premier temps, l'usage du béton de ciment était évident. En effet, ce matériau composite alliant des granulats (sables et gravillons) mélangés à un liant hydraulique (ciment) est aujourd'hui utilisé massivement dans le secteur de la construction et possède une énorme dette carbone en raison de son processus de fabrication.
Ce processus est réalisé en six étapes distinctes : extraction, homogénéisation,séchage, cuisson, refroidissement, broyage.
On extrait les matières premieres (calcaire et argile) dans des carrières, puis ces matières premières sont séchées et broyées afin de favoriser les réactions chimiques. Après ce séchage/broyage, nous obtenons ce qui est appelé « la farine ». Cette farine est chauffée dans un four afin de réaliser la décarbonatation du calcaire au therme de laquelle, on obtient : la chaux vive. Quant à l'argile, il se transforme en alumine et en silice. La chaux, le silice et l'alumine réagissent ensemble pour former le « clinker »
Cette étape de cuisson est extrêmement consommatrice d'énergie. Dans un document publié sur son site internet Ciments-calcia explique :
« *L'énergie calorifique consommée est considérable : 3200 à 4200 K Joules (l'équivalent de 100 kg de charbon) par tonne de clinker produit.* »
Le Clinker doit maintenant de nouveau être broyé et conditionné pour être vendu comme ciment.

En prenant en compte toute la vie du matériau (production, mise en oeuvre, recyclage etc.), l'énergie grise du ciment est d'environ 900 kwh/m^3



La production de ciment est en hausse en France approchant aujourd'hui les 25 millions de tonnes par an, cependant, la consommation de béton par habitant en France est plutôt faible d'après « Explorations-Architecturales ».

DEUXIEME PARTIE
II. DE L'IDÉE À LA MATIÈRE

1. Le liant papier.

Il nous est apparu évident en commençant les recherches sur l'ajout de cellulose (papier) dans une formulation de béton, qu'il existait deux méthodes pour baisser la dette carbone du béton : Soit, diminuer la quantité de liant cimentaire soit en remplaçant les granulats par des fibres de cellulose qui elles, bénéficient d'une dette carbone négative.

Nous choisirons de remplacer les granulats comme un choix logique, dans le sens où il est inenvisageable d'obtenir une cohésion de la cellulose non compressée sans un liant.

Au fil de nos recherches, nous découvrons l'existence d'un matériau approchant, nommé « liant-papier » ou Paper-crete. Ce matériau de construction inventé il y a 93 ans à fait l'objet d'un brevet déposé en 1928. Ce brevet n'a pas été industrialisé en raison d'une marge commerciale suffisante.

Le paper-crete est un matériau simple, aussi bien dans sa mise en oeuvre, que dans sa composition. Il est fabriqué à partir de papier, d'eau, de sable et d'un liant tels que la chaux ou le ciment. Grâce à cette simplicité et à un coût de revient de l'orde de 2€ le m2, ce matériau trouve une fort écho en auto-construction ou en architecture «d'urgence».

Il n'existe pas ou peu d'études sérieuses sur les qualités techniques du matériau. Cependant, Bashar S.Mohammed, aujourd'hui chercheur à l'université Ryerson de Toronto (indice H=5, i=2) à publié en 2009 une étude nommée «Papercrete as Infill

Materials for Composite Wall System» à travers laquelle il expérimente différents aspects du paper-crete. D'après son étude :

Le paper-crete possède une conductivité thermique comprise entre 0,06 W/mK et 0,08 W/mK. En comparaison, la laine de verre possède une conductivité thermique de 0,035 W/mK et le béton lui possède une conductivité thermique de 1,25W/mK. Ainsi, une brique de 20cm de béton papier est aussi efficiente que 10cm de laine de verre, le béton papier parait donc être un bon isolant.

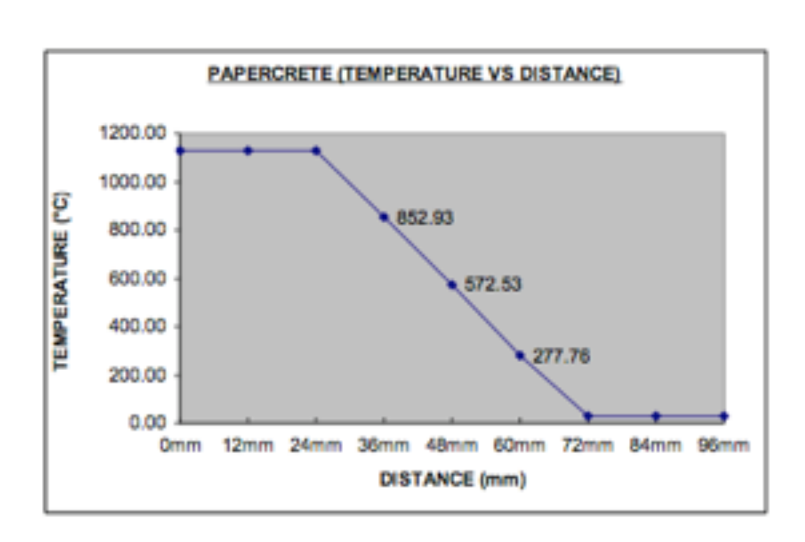
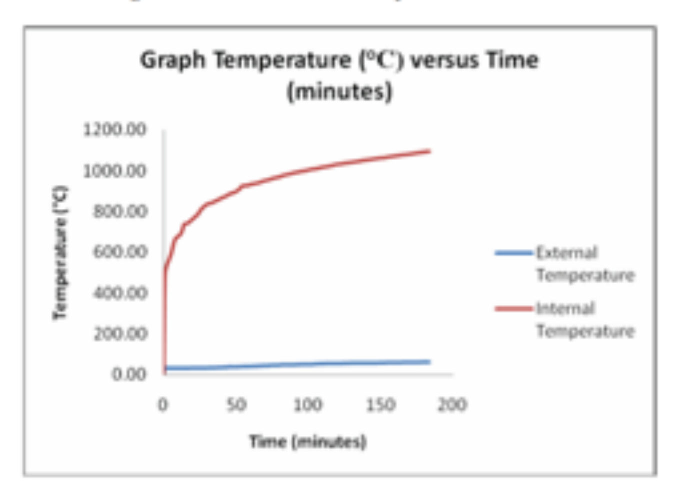
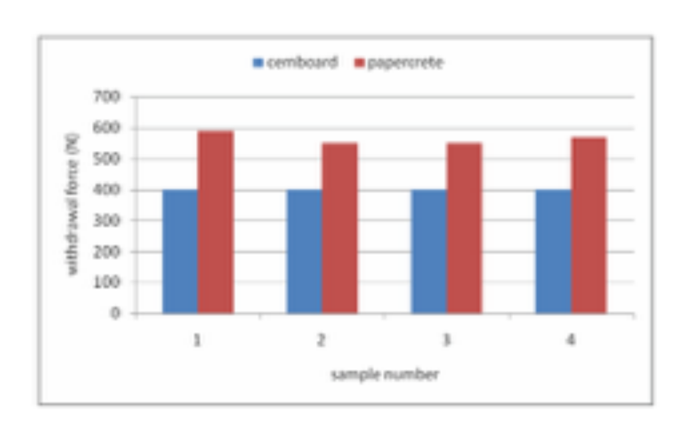


Figure 4: Internal & external temperature versus time



Contre toute attente, dans son étude, Bashar S.Mohammed montre que son échantillon possède une résistance au feu de 180 min sans perdre son aspect structurel.
De plus, grâce à sa faible conductivité thermique, la paroi externe du matériau reste froide tout au long de l'expérimentation.

Le paper-crete possède une masse volumique de 650Kg/m3 (celle du béton est de 2000Kg/m3) cette masse volumique faible en fait donc un matériau relativement facile à manipuler sur chantier.
Sa densité lui permet cependant aussi d'être relativement résistant face a l'arrachement. Ainsi, il faut une force de 565N pour arracher une vis enfoncée de 1cm dans du béton papier. Le béton papier est donc plus efficient que du ciment.



Lors d'un choc, le paper-crete se comporte comme un matériau ductile, il se déforme avant de se rompre. Ainsi, pour briser un bloc de liant papier de 10mmx10mmx70mm, nous avons besoin d'une énergie égale à 1,12J. En comparaison, un même bloc de ciment nécessite une énergie de 0,24J. Le liant papier est bien plus performant.
Un aspect qui demeure intéressant, est que la ductilité du liant-papier, lui permet d'absorber les chocs bien plus que d'autres matériaux. De plus cette ductilité permet l'usage de système de fixations (type vis) directement dans le matériau.
Structurellement, le liant papier possède une résistance à la compression de 140Kg/cm2 soit 13,7 MPa (béton de chantier = 30 MPa).

Suite à la lecture de cette étude, la composition du liant papier étant de 60% de papier, 30% de sable et 10% de ciment, et sa mise en oeuvre simple, nous entreprenons de réaliser à ce stade, quelques échantillons avec des dosages différents de ciments.
Nous collectons alors des journaux ainsi que des publicités. En quelques jours, nous disposons d'un stock suffisant pour couler les premiers échantillons.
Ne connaissant pas la quantité d'échantillons à réaliser, nous stockons une quantité de "pâte à papier" ce qui permettra d'observer, dans le même temps, la viabilité de cette matière première.



Le papier récupéré, il est déchiré en morceaux non réguliers et trempés dans un sceau de chantier.
Après 24h de bain, le papier s'est de lui même désagrégé dans l'eau et il ne reste qu'à homogénéiser le mélange en le malaxant.





En prélevant la quantité de matière souhaitée, le surplus d'eau contenu dans la pâte est ôté. Cette pâte de papier est ensuite mélangée au sable et au ciment dans les bonnes

proportions : 60% papier, 30% sable, 10% ciment, et cela jusqu'à obtenir un mélange homogène que l'on peut aisément mouler. (Nous avons réalisé 3 échantillons avec des dosages différents de ciment afin d'observer l'impact de celui-ci dans la résistance du





béton papier.)

Le premier problème rencontré se situe lors de la phase de séchage. En effet, notre échantillon a mis près de 14 jours à sêcher, stocké en intérieur tout en laissant une trace d'humidité jaunâtre au centre des blocs moulés.
Nous pouvons poser l'hypothèse que ce problème de séchage est dû à l'usage de barquette plastiques n'offrant au béton qu'une seule face exposée à l'air libre, condensant ainsi l'humidité du matériau par gravité dans le fond du moule.



Le second problème rencontré est la non homogénéité du mélange après sèchage. Le ciment, composant du mélange, se retrouve au fond des échantillons lors de leur démoulage. La face supérieure, est, quant à elle, restée très ductile.
L'échantillon est déformable à la main, et ne possède pas la résistance escomptée.
Pour ce problème, nous pouvons poser deux hypothèses, soit le mélange n'était pas homogène au moment du moulage. Soit le ciment est lui même descendu par effet de gravité et par entrainement de l'humidité au fond de l'échantillon.
Pour remédier à ces deux problèmes rencontrés, plusieures solutions s'offrent à nous. La quantité d'eau contenue dans le mélange induit une viscosité faible de celui-ci ainsi même si il est aisé à mettre en place, le mélange ne peut se maintenir seul. Il faut donc un moule perméable, laissant s'évacuer l'eau par gravité et offrant au moins 2 faces au séchage par aération (supérieure et inférieure). La deuxième solution est de vérifier l'homogénéité du mélange au moment de la mise en place du béton papier, cette étape demeure primordiale.

Finalement, et suite à cette expérimentation, un virage important est pris dans la démarche de recherche à ce moment. En effet, en raison de son temps de séchage, de sa non-recyclabilité incluant une perte de la cellulose et de l'importance des autres granulats dans le mélange (sable), l'usage du béton dans la formulation est remise en cause.
De plus, il se pose la question de la pertinence à réaliser de nouveau l'étude de Mr Bashar S.Mohammed.

2. Formulation.

Suite à cette remise en cause de l'étude, il a fallu trouver un nouveau "candidat" jouant le rôle de liant dans le mélange. Le plâtre ($Ca\text{-}SO_4$) fut sélectionné en raison de son caractère recyclable, de sa facilité d'utilisation et de ton temps de séchage réduit. Issu du gypse ($CaSO_4\text{-}2H_2O$), le plâtre est produit par désulfuration du gypse à basse température (150°C). Son bilan énergétique est donc largement meilleur que celui du ciment, car moins consommateur d'énergie dans sa phase de production.

Le plâtre est théoriquement infiniment recyclable de part son origine. Par chauffage à 150°, le gypse se transforme en sulfate hemihydraté (le plâtre) qui forme un liant et se réhydrate en gypse au contact de l'eau.

Suite aux expérimentations de "coin de table " sur le liant-papier, il paraissait évident que la question des quantités de matière était primordiale dans l'élaboration du mélange. La valeur la plus importante dans le dosage pour obtenir une résistance satisfaisante est le rapport eau/plâtre (E/P).
Ce rapport E/P, propre à chaque type de plâtre sera déterminant dans la formulation.

La première problématique de la formulation est donc de maintenir un rapport E/P constant tout en introduisant un mélange de fibres de cellulose humides.
La seconde problématique est d'obtenir un mélange homogène où plâtre et papier sont liés afin d'avoir à la fois un volume de matière conséquent et une résistance viable. Cette homogénéité est difficile à obtenir en raison de la capacité du papier à absorber et retenir l'eau. Trop sec, le papier absorberait l'eau du plâtre faisant chuter la résistance et ne permettant pas cohésion correcte de la matière. A l'inverse un papier trop humide ne respecterait pas la valeur E/P du plâtre causant par la même occasion une autre chute de résistance et une non homogénéité du mélange, ce cas est détaillé ci-après.

Avant la mise en oeuvre, nous avons fixé avec Mr R. LE ROY les objectifs de 70% de papier pour 30% de plâtre en volume. Cet objectif avait pour but, grâce à une forte concentration en papier, de connaitre la limite de cohésion et de viabilité du matériau.

Avant d'aborder la problématique du rapport E/P avec l'ajout de papier humide, nous avons décidé de valider la viabilité d'un ajout de papier dans du plâtre. La pâte à papier de l'expérience sur le liant-papier a été mélangée avec du plâtre possédant un E/P compris entre 0,4 et 0,5.

L’échantillon à été moulé dans un tube de carton de récupération diamètre 16cm et hauteur 25cm dont les parois ont été préalablement vernies afin de les rendre étanches. Nous pouvons constater sur cette image que le plâtre est venu par gravité se déposer dans la partie basse du tube laissant des « blocs » agglomérés de fibres de cellulose et de plâtre dans la partie haute.



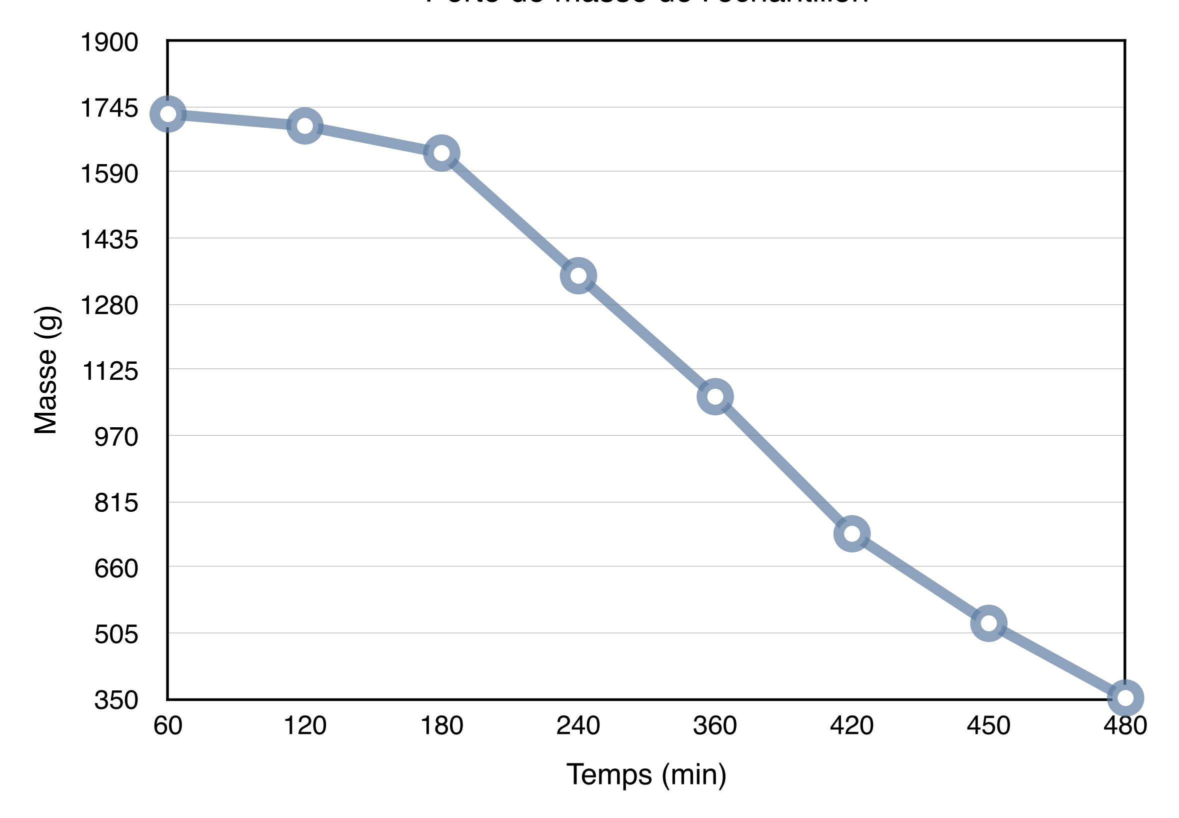
La hauteur de cette couche de plâtre correspond environ à 1/3 de la hauteur totale, ce qui est cohérent et en rapport aux 30% de volume de plâtre présent dans le mélange.
Les 70% de papier forment eux la couche supérieure de l’échantillon. La cohésion relative (friable à la main) est assurée par le plâtre emprisonné dans les blocs de cellulose.

Cette dissociation en couches distinctes est semblable au comportement du liant-papier de l’expérimentation précédente. Le mélange étant homogène au moment du moulage de l’échantillon, nous pouvons en conclure que le plâtre a « absorbé » l’eau contenue dans la pâte de papier en augmentant sa fluidité et lui permettant par gravité et en raison d’une masse volumique plus élevée ($\rho = 2{,}75$ g/cm^3) de décanter au sein de l’échantillon. Le papier lui, ne possédant qu' une masse volumique de $\rho = 0{,}7$ g/cm^3 est venu « flotter » sur la couche de plâtre.
Cette échantillon valide toutefois la viabilité du mélange papier/plâtre car la partie supérieure de l’échantillon, bien que non homogène, prouve par la présence de ces blocs, la cohésion de matière entre les deux matériaux. Il prouve aussi par la même occasion nos intuitions quant à l’importance de la formulation du matériau et le regard attentif qu’il faut porter sur la prise en compte de la quantité d’eau contenue dans la pâte de papier.

En préalable à la formulation, il est nécessaire d'évaluer la capacité d'absorption en eau du papier afin de connaitre la quantité d'eau qu'il contiendra en fonction de sa masse volumique.
Pou cela, nous prenons donc un échantillon de 1dm^3 soit 700g de papier journal que nous laissons tremper dans de l'eau jusqu'à saturation puis nous mesurons à nouveau le poids de l'échantillon, celui-ci pèse maintenant 3,4Kg sa masse humide est donc d'environ 5x sa masse sèche.
De plus, il y a une forte augmentation du volume apparent de l'échantillon. Les fibres de celluloses mouillées se distendent et le volume augmente. Cette propriété est intéressante car le plâtre séchant plus vite que le papier à l'air libre, et enrobant les fibres de cellulose, il va figer les fibres dans l'état où elles occupent un maximum de place. En séchant l'eau sera progressivement remplacée par du vide permettant de mettre en valeur ses capacités de matériau isolant, tout en conservant l'avantage d'une faible densité.

Maintenant que la capacité d'absorption d'eau du papier est connue, nous nous intéressons à sa capacité de rétention de l'eau dans ses fibres et donc à sa perte de poids à l'étuvage. (Attention : ce test m'a valu une belle surprise de la part d'EDF sur ma facture d'électricité).
Dans cette démarche, nous avons placé un échantillon humide dans un four électrique. Le four en fonction, nous mesurons à intervalle de temps régulier le poids de l'échantillon. Nous utilisons un échantillon plus petit que pour le test précédent en raison du temps de séchage nécessaire. Soit 0,5 dm^3. Nous pourrons cependant extrapoler ces résultats à un échantillon de 1 dm^3.
Le four utilisé sera chauffé à 100°C car la température de fusion de la fibre de cellulose se situant aux alentours de 150°C nous pouvons ainsi garder une vaste marge de sécurité afin de ne pas dégrader le papier.

Temps (min)	Poids (g)	Commentaires	Temps (h)
0	1736	Ceci correspond au temps de chauffe de l'échantillon	0
60	1728		1
120	1700		2
180	1636	Première baisse significative	3
240	1347		4
360	1062		5
420	739		6
450	528		6,5
480	352	Au delà ce cette limite le poids de l'échantillon reste relativement stable	7



Ainsi la teneur en eau du papier est de w= (mh-ms)/ms soit w=3,93
A la sortie de l'étuvage, la couleur de l'échantillon a fortement varié, passant d'un gris foncé à un blanc cassé.

A la vue de ces essais, nous avons décidé d'utiliser une valeur moyenne de masse volumique du papier, en estimant que le papier était à saturation d'eau et qu'il n'en relâcherait ni n'en absorberait dans le mélange, n'influant pas le E/P du mélange et garantissant une bonne résistance du matériau. Cette masse volumique est de
ρ = 1,5g/cm3 soit un peu plus de 2 fois sa masse volumique sèche.

Dans le but de réaliser un test de résistance à la compression, l'éprouvette de matériau réalisée sera une éprouvette cylindrique type normalisée ou h=2d
Dans notre cas, nos éprouvettes ont une section d=0,08m et une hauteur h=0,16m soit un volume $v=\pi r^2.h$

Les données sont donc:

Volume v=0,8 dm^3
70% de papier
E/P = 0,4
Masse volumique du papier $\rho_{pa} = 1,5\ g/cm^3$
Masse volumique du plâtre $\rho_{pl} = 2,75\ g/cm^3$

Masse volumique de l'eau $\rho_e = 1$ g/cm^3



Ainsi pour un volume de 1dm^3 de mélange, nous avons 0,7dm^3 de papier pour 0,3dm^3 de plâtre. Ces 0,3dm^3 de plâtre sont eux même composés de 40% d'eau.

Soit pour 1dm^3 :
V_{pa} = 0,7dm^3
V_{pl} = 0,18dm^3
V_e = 0,12dm^3

Donc pour 0,8dm^3 :
V_{pa} = 0,560 dm^3
V_{pl} = 0,144 dm^3
V_e = 0,096 dm^3

Soit en masse :
M_{pa} = 840 g
M_{pl} = 396 g
M_e = 96 g

3. Essais.

Suite à la mise en place de la formulation et forts de l'expérience acquise lors des essais précédents, nous réalisons trois éprouvettes cylindriques d=0,08m h=0,16m à différentes concentrations de papier.

E0 : Eprouvette témoin à 0%
E2 : Eprouvette à 20%
E7 : Eprouvette à 70%

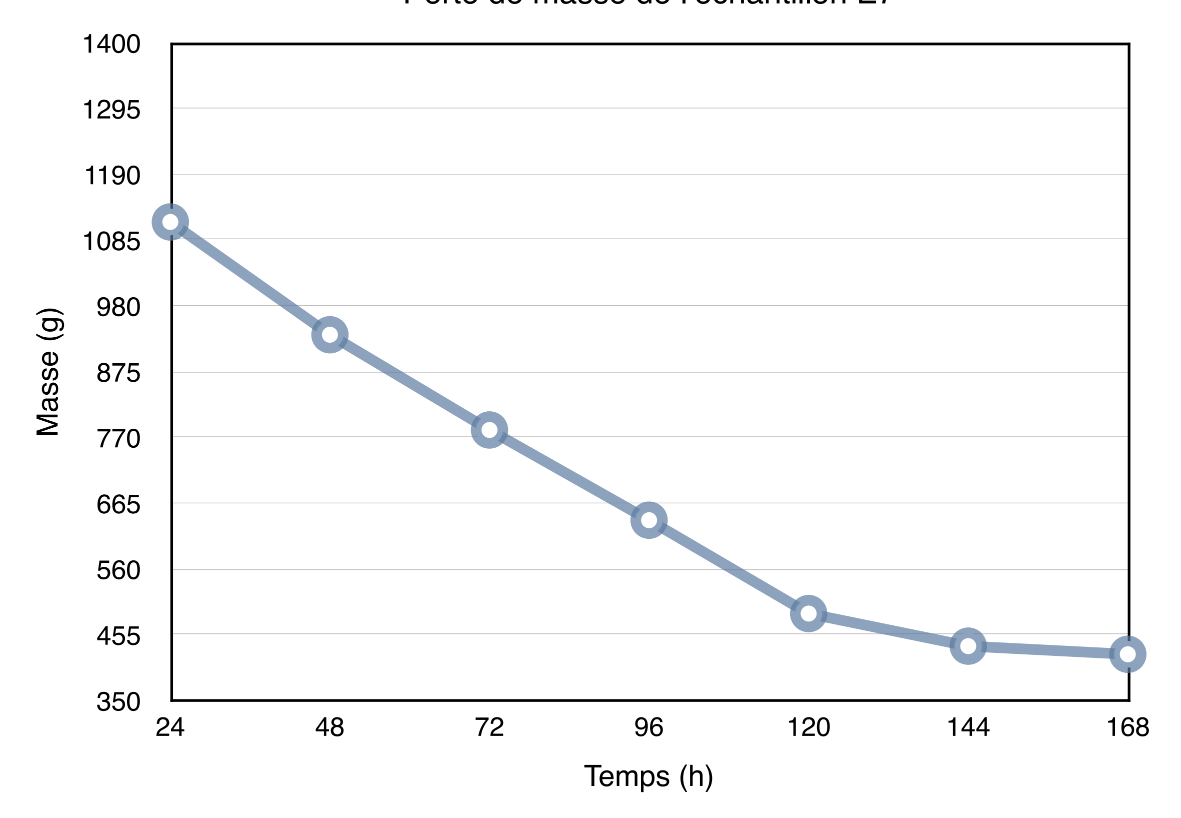
Pour réaliser les échantillons, nous utilisons un plâtre de type α (plâtre Profilia), un plâtre hautement résistant et coûteux.
Le E/P du plâtre Profilia est de 0,4 ce qui correspond à la formulation mise au point. Le coffrage sera réalisé grâce à deux tubes PVC de plomberie diamètre 80mm coupés à la bonne longueur et fendus dans la hauteurs pour faciliter le décoffrage. Afin d'assurer une étanchéité des tubes, les deux tubes sont assemblés l'un sur l'autre et maintenus en place à l'aide d'un collier métallique.

Le plâtre possédant une prise rapide. Dans le but de maximiser la surface de contact de l'éprouvette avec l'air ambiant pour de favoriser le séchage uniforme de l'échantillon, le décoffrage a lieu dans l'heure suivante.
L'échantillon E7 à 70% se trouve alors être très humide au toucher et particulièrement chaud à cause de la réaction chimique exothermique de transformation du plâtre.

L'échantillon pèse à ce moment 1328g, nous entreprenons de le peser à différents intervalles de temps afin de mesurer sa perte en eau, dans le but de connaître son temps de séchage complet et de pouvoir comparer ces résultats à ceux de l'étuvage précédent.

Temps (h)	Poids (g)	Commentaires	temps (jour)
0	1328		0
24	1114		1
48	934		2
72	782		3
96	638		4
120	489		5
144	437		6
168	424	Au delà ce cette limite le poids de l'échantillon reste relativement stable	7





Avec un poids définitif de 424g pour un volume de 0,8dm^3 l'échantillon E3 possède une masse volumique de 530g/dm3, l'échantillon est donc moins dense que l'eau. Il est beaucoup moins dense que l'échantillon E0 à 0% de papier possédant lui une masse volumique de 1715g/dm^3.

Cette faible densité de l'éprouvette E7 à une grande proportion de vide en son sein. Cette quantité de vide aura nécessairement un impact non négligeable sur la résistance du matériau à la compression.

Pour vérifier cette hypothèse, nous utilisons la presse 10T disponible à l'ENSAPM afin de vérifier la résistance des éprouvettes, nous pouvons déjà anticiper que la résistance va largement chuter avec l'augmentation du pourcentage de papier dans les échantillons.
Afin de pouvoir négliger les variations de l'état de surface de l'éprouvette, les deux extrémités de celles-ci ont été égalisées et du sable fin (sable de fontainebleau) reparti à leur contact.

La presse est équipée d’un manomètre permettant de mesurer la pression exercée sur le piston et donc de calculer la contrainte à la rupture de l’échantillon.



L’éprouvette E0 a rompu aux alentours de 300 bars
Rupture de type explosive, projection violente de morceaux de plâtre.

D’après les données constructeur de la presse, nous savons que 100 bars au manomètre correspondent à une force de 13,7kN sur la tête de piston.
Donc 300 bars nous donnent une force f= 41,1kN

La contrainte à la rupture de l’éprouvette E0 est donc :
σ=F/S
soit σ=8,1 N/mm^2
donc σ=8,1 MPa

Ou S est la section de l’éprouvette (en mm^2) soit ici 5024mm^2

L’éprouvette E2 à été testé avec la même méthode que l’éprouvette E0.



La résistance est ici de 210 bars au manomètre, comme prévu, la résistance chute avec l’augmentation de la quantité de papier ajoutée au mélange.
Suivant la même technique que précédemment, 210 bars nous donnent une force
f= 28,77kN

La contrainte à la rupture de l’éprouvette E0 est donc :
σ=F/S
soit σ=5,7 N/mm^2
donc σ=5,7 MPa

L'éprouvette E7 à été testée avec la même méthode que l'éprouvette E0.

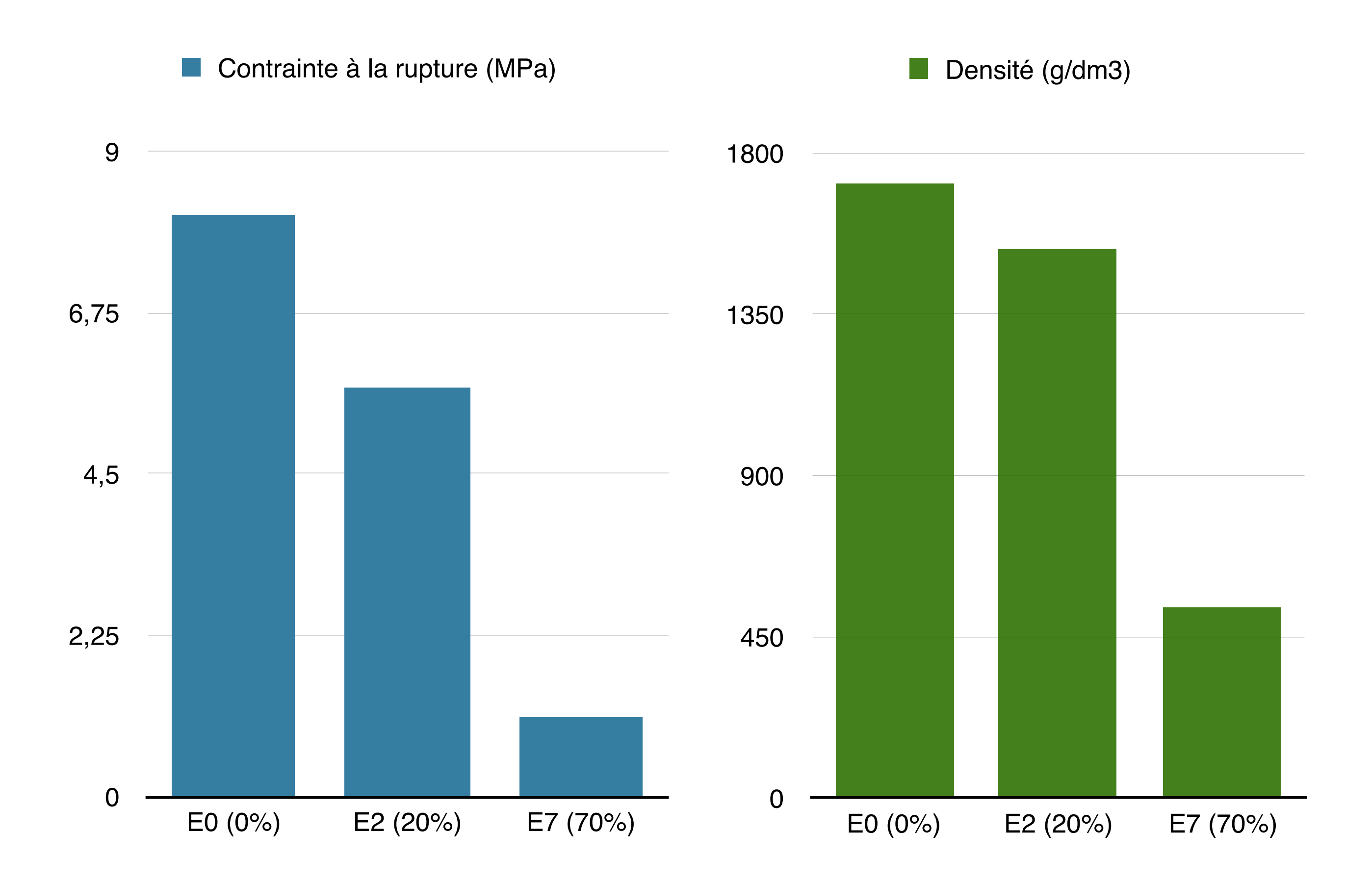


La résistance est ici de 40 bars au manomètre, Cette fois, la résistance chute énormément.
Suivant la même technique que précédemment, 40 bars nous donnent une force f= 5,48kN

La contrainte à la rupture de l'éprouvette E0 est donc :
σ=F/S
soit σ=1,1 N/mm^2
donc σ=1,1 MPa

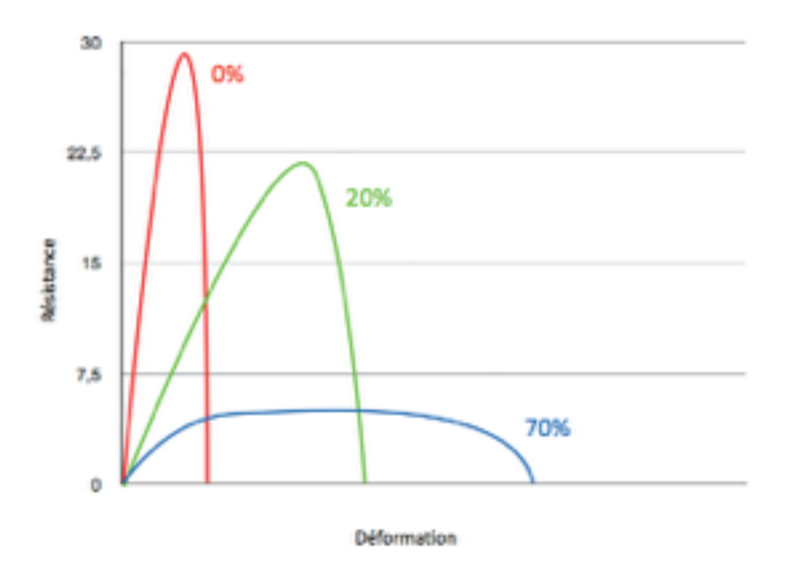
Nous pouvons résumer cette série d'expériences par le tableau suivant :

Eprouvette	Resistance à la compression (kN)	Contrainte à la rupture (MPa)	quantité de papier (%)	Commentaires
E0	**41,1**	8,1	0	Rupture explosive
E2	**28,77**	5,7	20	Cisaillement
E7	**5,48**	1,1	70	Déformation



Nous pouvons observer que la densité et la résistance des éprouvettes sont liées induisant le comportement du matériau à la contrainte. Ainsi, un matériau dense avec une bonne résistance laisse à observer un comportement de type fragile avec une rupture explosive. A l'inverse, l'éprouvette E7 contenant un matériau peu dense, sans grande résistance, laisse à observer une rupture de type ductile.

Nous pouvons ainsi tracer une courbe résistance/déformation comme telle :



La troisième caractéristique qui découle directement de la proportion de vide au sein du mélange est la résistance thermique du matériau. le vide étant isolant, la résistance thermique doit augmenter proportionnellement à la quantité de papier présent dans le mélange.

Avec un λ = 0,35 W/(m.K), le plâtre est un relativement bon isolant, même si il est loin d'être aussi efficient qu'un isolant standard (λ = 0.045 W/(m.K) pour la laine minérale) il reste bien plus efficace que le béton (λ ± 1,45 W/(m.K))

Test du lambda :

Nous avons réalisé à l'ENPC un test de résistance thermique du matériau sur deux éprouvettes différentes :
E5 - Eprouvette à 50% de volume de cellulose.
E7 - Eprouvette à 70% de volume de cellulose.

Le test est réalisé à l'aide d'un lambda-mètre à hygrométrie ambiante. Une sonde est coincée entre deux blocs du matériau et mesure ainsi sa résistance thermique. Chaque bloc est mesuré et pesé afin de déterminer sa masse volumique.

	Échantillon1 L x l x H(cm)	Échantillon2 L x l x H(cm)	Masse 1 (g)	Masse 2 (g)	Masse volumique (g.cm
E7	7,40 x 10,35 x 14,72	7,5 x 10,4 x 14,79	698,9	686,6	0,6
E5	7,35 x 10,15 x 14,8	7,65 x 10,41 x 14,95	845,3	891,2	0,76

Les résultats des tests de résistance thermique sont les suivants :

Eprouvette	Essai 1 - W/(m.K)	Essai 2 - W/(m.K)	Moyenne - W/(m.K)
E7	0,148	0,142	0,145
E5	0,212	0,221	0,217

Avec un Lambda de 0,14 W/(m.K) le matériau ne peut être considéré comme un isolant thermique (laine de roche : λ = 0,045 W/(m.K)). Cependant, le matériau conserve une propriété d'isolation intéressante en regard du lambda du béton (λ±1,45 W/(m.K)).

L'application du matériau comme isolant thermique n'est donc pas envisageable, toutefois, cette faible capacité isolante pourrait lui permet d'apporter une isolation de complément.

TROISIEME PARTIE
III. DE MATIÈRE A MATÉRIAU

1. Principe de mise en place

Après ces expériences sur la matière, nous nous sommes focalisés sur la réalisation d'un objet manipulable par l'homme et utilisable sur chantier, afin de tester la mise en oeuvre de la matière à plus grande échelle.
Dans ce but, nous collectons une grande quantité de papier usagé, principalement du papier journal mais aussi quelques kilos de papier d'impression d'une agence d'architecture non loin de mon domicile ainsi qu'un peu de papier kraft d'emballage. C'est au final près de 50Kg de papier qui ont ainsi été collectés.
En cherchant des filières de récupération, nous nous sommes aperçu que certaines entreprises détruisants leurs documents (découpage machine en fine bandelettes) conditionnaient ceux-ci dans des sacs d'environ 20kg, s'adresser à ces entreprises pourrait simplifier grandement la collecte.

La question de la matière première étant réglée, il nous restait à trouver quel objet réaliser, et quel produit existant pourrait ainsi être concurrencé. A ce moment, deux choix sont imaginés, soit essayer de réaliser une plaque type Fermacel, soit venir concurrencer le bloc-béton. C'est finalement cette deuxième solution qui est retenue en raison de sa compacité et du défi technique que représente son coffrage, tout en apportant une amélioration sur le plan de l'énergie grise de ce matériau (700kwh/m^3).

Il existe aujourd'hui sur le marché trois grands type de bloc-béton:
Le bloc usuel, 10X20x50, non porteur.
Le bloc de jardin, 10x20x50, réalisation de petites constructions (abris, etc.).
Le bloc de construction, 20x20x50, porteur.

C'est ce dernier bloc de construction qui nous intéresse ici. En effet, même si sur le plan structurel, l'éprouvette E7 a montré des lacunes du matériau, il n'en reste pas moins qu'en faisant varier la proportion de papier dans le mélange, il est possible d'obtenir un bloc porteur (éprouvette E2). De plus, cet objet est avant tout un démonstrateur de la capacité de mise en oeuvre du matériau à travers une grande quantité de matière.

L'idée première est de s'inspirer de la méthode de production des blocs béton pour réaliser mon parpaing de plâtre-papier, ces blocs sont fabriqués par pressage.

Le béton arrive par tapis dans une trémie située dans la partie supérieure de la machine. Il descend par gravité.
Une planche est placée sur la table vibrante qu'un moule vient recouvrir. Sa hauteur est supérieure de quelques centimètres à la hauteur finie des blocs manufacturés.

Un panier racleur amène au dessus du moule, une certaine quantité de béton pour le remplir. Pour être sûr du bon remplissage, la table vibre une première fois pendant quelques secondes. Ensuite le panier racleur recule et laisse place à un contre moule dont les formes en saillie épousent celle du moule.
Une deuxième phase de vibration peut alors s'exécuter pendant laquelle le contre moule commence par descendre à l'intérieur du moule pour aider à tasser le béton.
Sans vibration, le moule remonte, le contre moule assurant un parfait démoulage des blocs. La planche peut alors être évacuée et un nouveau cycle peut recommencer.

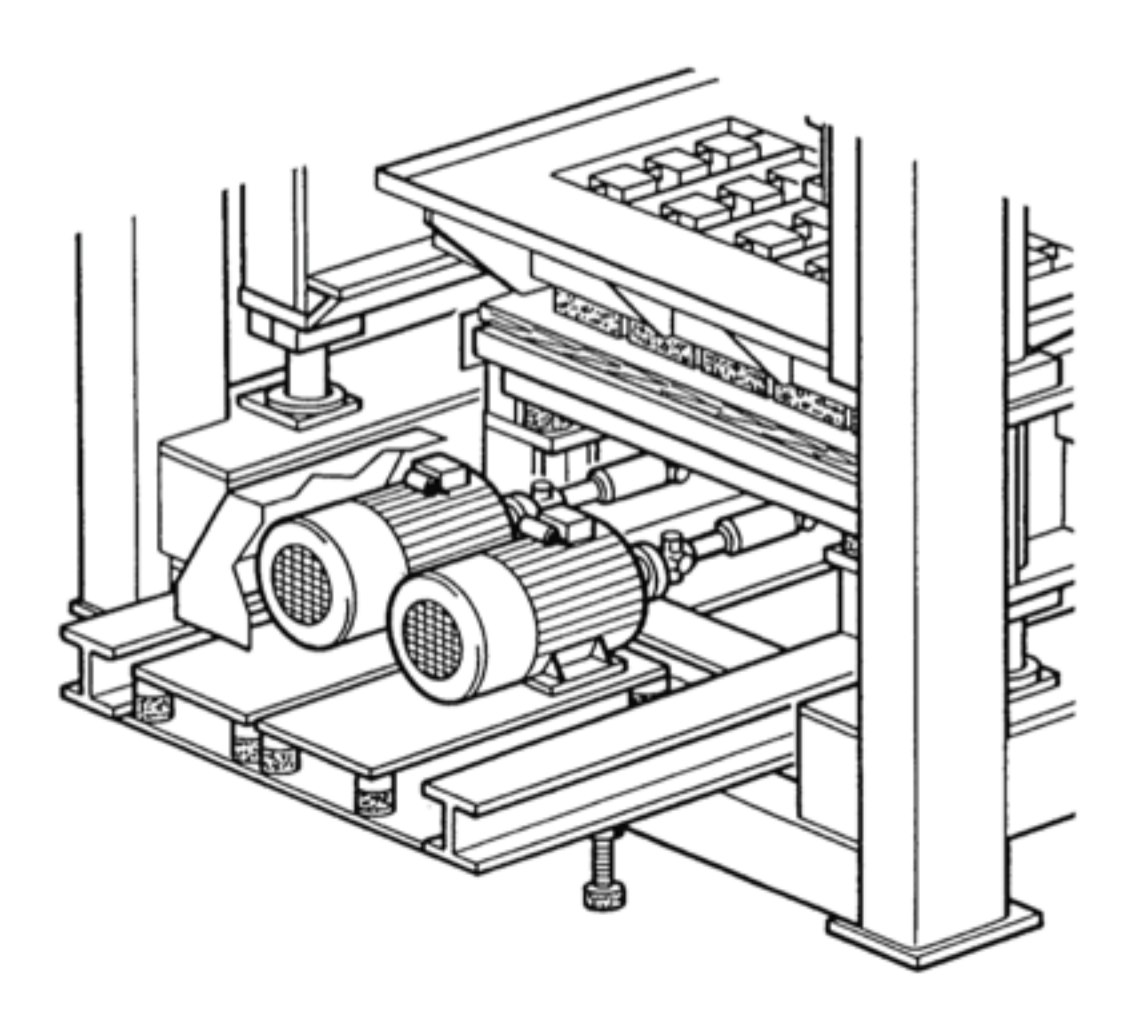
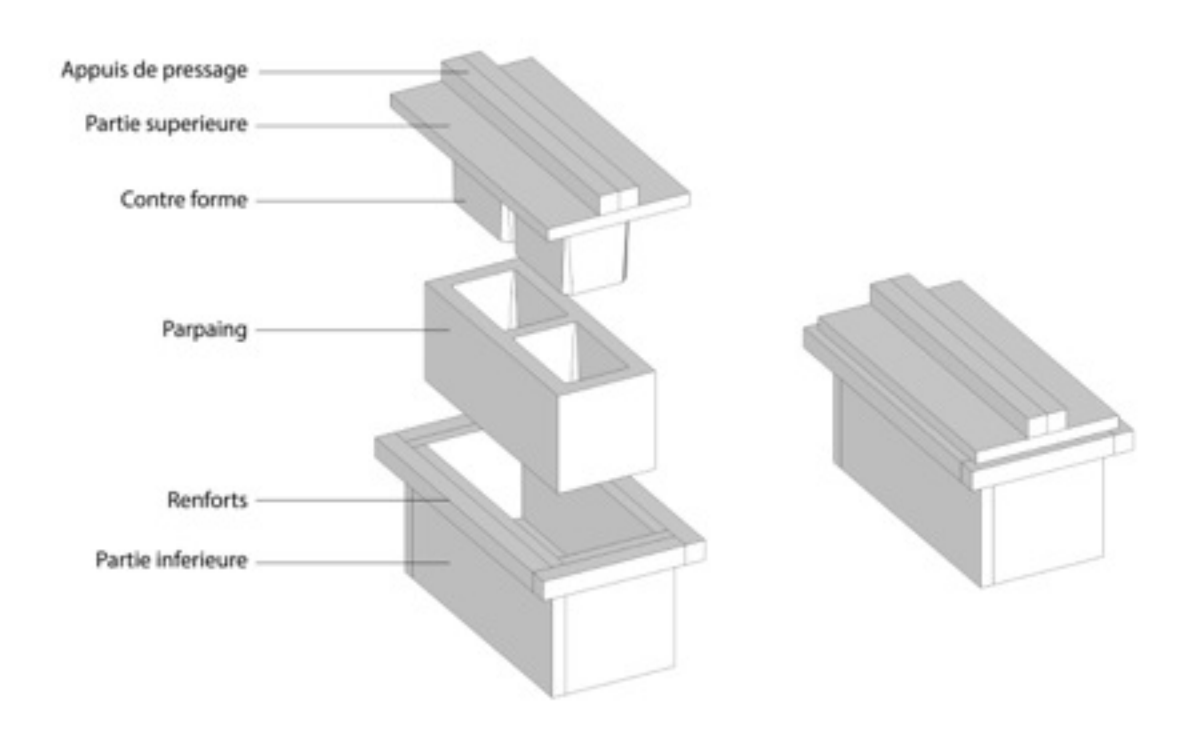


Image d'une presse à bloc-béton extraite d'un dossier technique de fabrication de blocs manufacturés en béton.

L'idée est donc de réaliser un coffrage dont la partie supérieure du moule possède une contre forme permettant la création des alvéoles du parpaing.
Après une discussion d'ordre technique avec Mr B.Veran au labo bois de l'ENSAPM nous avons envisagé de presser le bloc grâce à la presse 10T disponible à l'école.

Nous avons aussi esquissé la forme que prendrait le moule et les renforts nécessaires pour contenir les efforts de la presse afin d'éviter l'explosion du moule.



La partie inférieure du moule est libre de glisser afin de démouler le parpaing, l'ensemble des parois seront réalisées à l'aide de contreplaqué de coffrage offrant un aspect lisse et non adhérent. Les angles des contres formes seront biseautés à la dégauchisseuse afin de faciliter le démoulage, les renforts seront réalisés à l'aide de chevrons 30x60mm et les efforts seront repris dans leur hauteur. Enfin, l'assemblage sera collé et vissé.
Le bloc aura un volume V=11dm3

2. Essais

En reprenant les calculs de l'échantillon E7 à 70%, nous pouvons en déduire les quantités de matière à mettre en oeuvre dans le parpaing de plâtre et papier.

Soit pour 1dm^3 :
$V_{pa} = 0{,}7dm^3$
$V_{pl} = 0{,}18dm^3$
$V_e = 0{,}12dm^3$

Donc pour 11dm^3 :
$V_{pa} = 7{,}7\ dm^3$
$V_{pl} = 2{,}16\ dm^3$
$V_e = 1{,}32\ dm^3$

Soit en masse :
$M_{pa} = 11550\ g$
$M_{pl} = 5940\ g$
$M_e = 1320\ g$

Nous avons donc entrepris le déchiquetage de 11kg de papier puis mis ces 11kg à tremper dans une poubelle contenant un grand volume d'eau.

Au bout de 24h, la pâte de papier est mélangée à l'aide d'un malaxeur à béton. Première surprise, le papier n'était pas totalement imbibé d'eau celui-ci ne se « délayait » pas complètement au malaxage, laissant de larges bandelettes entières voir des blocs agglomérés dont le centre était sec.



Même opération 48h après le début de la trempe. Cette fois, l'obtention de la pâte à l'air correcte, nous pouvons donc maintenant commencer à extraire les 11kg de papier de l'eau.

Le papier est extrait dm^3 par dm^3, et nous le pressons pour supprimer le surplus d'eau. A l'aide de pesées successives nous contrôlons la quantité d'eau extraite de la pâte afin d'obtenir la bonne masse volumique
$\rho_{pa} = 1{,}5\ g/cm^3$.

Nous nous procurons un sac de plâtre de marque Axton possédant un E/P compris entre 0,4 et 0,6

Nous effectuons le mélange dans une auge à ciment. Premier constat : le mélange ne se comporte pas comme d'habitude, il parait beaucoup plus sec et donc, beaucoup plus visqueux.
nous plaçons le mélange dans le moule réalisé à l'école et nous pressons sa partie supérieure à l'aide d'un cric 2T sur lequel est posé un étai métallique appuyé sur un IPE au plafond.

Nous commençons à presser l'ensemble, le plâtre prenant très vite, le mélange était déjà en train de prendre au moment du pressage (ce qui explique la qualité médiocre des images prises dans la précipitation.)



Finalement l'essai s'avère être un échec. En effet, la matière n'est absolument pas remontée sur le coté des contres formes. Le mélange s'est tassé au fond du moule sous les contres formes et celles-ci ne sont pas rentrées entièrement dans la matière.
De plus l'ensemble de la partie supérieure ne s'est pas enfoncée uniformément et s'est placée de travers en raison de l'absence de guide sur le moule.

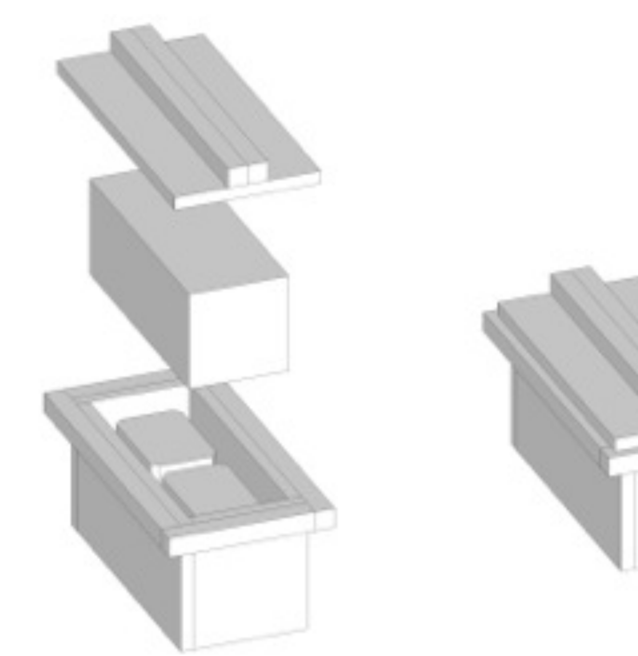
Au démoulage, l'ensemble ne possédait pas de cohésion dans la partie non compressée, les cotés du parpaing se sont donc effondrés immédiatement et l'aspect grumeleux valide l'hypothèse d'un mélange non homogène, trop sec et beaucoup trop visqueux.



En partant du principe que le plâtre possède un E/P compris entre 0,4 et 0,6. Cette expérimentation sera reproduite une nouvelle fois en ajoutant de l'eau (et du plâtre) dans le mélange avec au final les mêmes résultats si ce n'est que le parpaing n'a toujours pas séché âpres plus de 4 semaines à l'air libre.

3. Correction

En regard à ces deux échecs, nous avons essayé d'en analyser les causes.
La première de ces causes est pour nous un mélange bien trop sec. Le papier forme des blocs qui se mélangent très mal avec le plâtre. Ceci en raison selon nous d'un problème lors de la préparation de la pâte à papier. Celle-ci n'est pas assez homogène et des points non saturés d'eau apparaissent. Formant des agglomérats de papier autour d'eux.
La deuxième de ces causes est un problème de pressage, le manque d'un guide sur le moule empêche la descente homogène et contrôlée des contres formes dans la matière.



Pour pallier à la première problématique, nous décidons d'augmenter le temps de trempe du papier, d'augmenter le temps de malaxage et d'être beaucoup plus attentif sur la phase de pesée du papier après essorage.
Le papier à finalement trempé 4 jours, au malaxage, il s'est cette fois bien mieux décomposé, après essorage à l'aide d'un morceau de tissu, le papier à l'air homogène.

Pour pallier à la seconde problématique, nous décidons d'essayer de simplifier le processus en limitant l'importance de la presse dans la mise en forme. Ainsi en « retournant le moule », c'est à dire en plaçant les contres formes dans la partie basse l'on se débarrasse des frottements des contres formes au bénéfice d'une simplification du pressage. Cependant, il nous faudra couler avec beaucoup plus d'attention la matière, afin de remplir convenablement les parois du parpaing. En dernier et dans le but d'aider la mise en place de la matière, nous pourrons vibrer le parpaing avant pressage de la partie supérieure en secouant l'ensemble du moule et en frappant ses parois avec un maillet caoutchouc.

Par manque de matière, le ceinturage de la partie haute du moule sera finalement réalisée à l'aide d'une sangle automobile.





Nous gardons un E/P=0,4 et une proportion de 70% de papier dans le mélange.

Soit pour 11dm^3 :
V_{pa} = 7,7 dm^3
V_{pl} = 2,16 dm^3
V_e = 1,32 dm^3

Donc en masse :
M_{pa} = 11550 g
M_{pl} = 5940 g
M_e = 1320 g

Le mélange est malaxé dans un sceau à l’aide d’un malaxeur à béton, puis coulé dans le moule.





Finalement le pressage peut s’effectuer à la main, le surplus de matière correspondant à l’augmentation du volume apparent de papier s’évacue de lui-même même par la partie haute du coffrage.

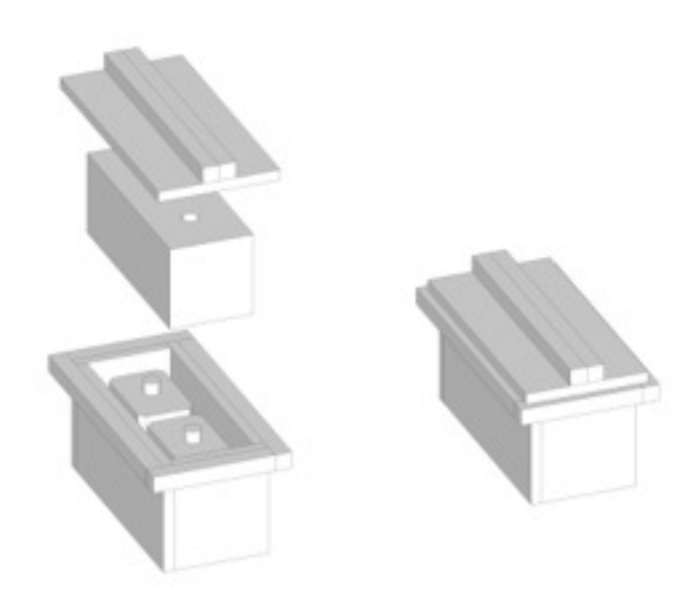




Après 24h de séchage, nous entreprenons le démoulage. Le retrait de la partie haute est



très simple. Le retrait de la partie basse, bien que plus difficile, se passe bien et cela, grâce au fond comportant les alvéoles.
A ce stade, les alvéoles sont toujours présentes dans le parpaing. Après un essai raté de démontage des alvéoles et la casse d'une paroi du parpaing, nous entreprenons une dernière modification du coffrage.
L'ajout d'une pièce de bois circulaire de hauteur h=3cm au sommet des alvéoles, cette pièce permettra de sortir les contres formes des alvéoles en couchant le parpaing et en tapant sur la contre forme. Cette pièce produira en revanche 2 trous circulaires sur la face supérieure du parpaing.



Finalement, après un nouvel essai dans le dernier prototype de moule, le démoulage se passe correctement. Le parpaing va sécher environ 10 jours à température ambiante avant d'être complètement sec.
Il pèse 6,4kg soit une masse volumique $\rho = 0,58$ g/cm^3



Nous pourrions maintenant imaginer en produire plusieurs et assembler un bout de mur comme démonstrateur technique.

Pistes, développements et conclusion

Il reste beaucoup d'aspects à caractériser sur ce matériau, il peut encore faire l'objet de nombreuses expérimentations.

Nous avons testé empiriquement, dans une expérience de coin de table, avec un chalumeau de cuisine, la résistance au feu de l'éprouvette E7 et contre toute attente, le matériau noirci, se consume, mais ne brûle pas. Cet aspect reste à tester de manière plus approfondie.

Une autre piste d'amélioration du matériau est l'ajout d'amidon dans le mélange . En effet de l'amidon est ajouté dans la composition des plaques de Placo-Platre ou de Fermacel car il a la propriété d'augmenter la liaison avec le papier.
Pour exemple la colle à base d'amidon largement utilisée avec le papier maché, produite à partir d'eau et de farine.

Enfin, une dernière piste d'approfondissement est la recherche d'une manière de rendre le matériau hydrophobe. Nous avons pendant quelques temps imaginer utiliser en faible quantité un liant ciment dans le mélange pour retrouver cette caractéristique. Finalement ces recherches ont butées sur le risque de production d'étringite dans le matériau à cause de la non compatibilité chimique ciment/plâtre.

Pour conclure ce mémoire, ce cycle de recherche à été pour nous l'occasion de confronter une idée à une réalité technique, et le passage de la création de matière en un matériau de construction. De plus, ce séminaire de recherche nous a apporté une certaine rigueur sur le mode opératoire et l'apprentissage de la caractérisation de plusieurs aspects d'un matériau. Par ailleurs, ces recherches nous ont offert un apport de connaissances techniques propres aux matériaux.
L'aspect environnemental de la recherche est un facteur largement stimulant. En effet, en abordant la problèmatique du papier, nous étions loin d'imaginer la quantité de ressources non exploitées et le gâchis monumental que cela représente à l'échelle de la planète. Pourtant le problème du papier est anecdotique sur le plan environnemental, et force à considérer dans une prise de conscience plus large, l'importance du traitement de nos déchets et de nos modes de productions/consommations modernes.
Cette prise de conscience est d'autant plus flagrante qu'elle fait écho à notre rôle d'architecte dans lequel ces questions environnementales doivent êtres prises en compte dès la phase de conception.

Remerciements

Je tenais à remercier sincèrement les personnes qui m'ont apporté leur aide et leur soutien dans l'élaboration de ce mémoire.
Je remercie Mr Robert Le Roy en tant que Directeur de Recherche ainsi que Mme Leda Dimitriadi et Mr Benoit Veran pour leur disponibilité tout au long de ma démarche.
Mes remerciement s'adressent aussi à ma famille et plus particulièrement à mes parents qui ont supporté les nombreuses expérimentations dans notre maison familiale.
Enfin, j'adresse mes remerciements à mes amis et mes proches pour leurs encouragements.

Sources

Papercrete as Infill Materials for Composite Wall System, *Bashar S.Mohammed.*
Hybrid Composite Wall System by Using Local Waste: Panel of cement Bonded Wood In Filled with Papercrete, *Bashar S.Mohammed, S. A. Masjuki, H. M. A. Al-Mattarneh.*
Les isolants naturels pour une maison saine, *Collectif Saep*, SAEp
L'âge de l'homme, Construire le monde de demain à l'ère de l'Anthropocène. *Christian Schwagerl*, manifesto.
Destruction Massive, *Jean Ziegler*, Seuil.
Dossier technique de fabrication de blocs manufacturés en béton.
Isolation thermique et acoustique, *Christophe branchu, Michel branchu*, Eyrolles
Physique des polymères, P*atrick Combette, Isabelle Ernoult*, Hermann
Polymères, *Sandrine Marceau*, Conférence à l'ENSAPM dans le cadre du R8 AMC2

http://www.explorations-architecturales.com/data/new/fiche_22.htm
http://www.paris.fr/pratique/ordures-menageres-tri/comment-trier/secteurs-a-fort-potentiel-de-tri/rub_8584_stand_123995_port_20232
http://www.leseec.org/compress/CPleseec.pdf
http://www7.inra.fr/dpenv/pdf/SaviniD20.pdf
http://fr.slideshare.net/Manish_An2d/papercrete
http://www.labrivert58.fr/SWaP/DOC/conducte.pdf
http://pedagogie.ac-toulouse.fr/lyc-parc-ramonville/BLOG-PAPERCRETE/dotclear/index.php
http://www.eurojournals.com/ejsr_34_4_01.pdf